

УДК 004.4:621.452

Д. А. АХМЕДЗЯНОВ, А. Е. КИШАЛОВ

К ВОПРОСУ ОБ АДЕКВАТНОСТИ ТРЕХМЕРНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГТД В СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ

Рассмотрена проблема обеспечения адекватности трехмерного газодинамического моделирования в современных программных комплексах (ANSYS CFX и FlowVision), проведена проверка соответствия расчета и эксперимента. *Авиационные двигатели; газодинамическое моделирование; программные комплексы*

Широкий спектр проектных работ, сложность конструкции авиационных двигателей, сжатость сроков выполнения заказов, усиление конкурентной борьбы на рынке заставляют авиадвигательные предприятия проводить работы на самом современном техническом уровне. Конструирование, анализ и технологическая подготовка производства осуществляются с использованием преимущественно «тяжелых САПР». Выбор, организация работы и их использование производятся в рамках единой концепции развития средств проектирования и технологической подготовки производства, способных решать поставленные перед разработчиками задачи.

На современном этапе развития газотурбинной техники становится невозможным проводить расчеты перспективных изделий без применения численного трехмерного газодинамического моделирования. Однако встает проблема адекватности трехмерного газодинамического моделирования и проверки соответствия расчета и эксперимента.

РАСЧЕТЫ В ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ ANSYS CFX И FLOWVISION

Для сравнения результатов расчета с экспериментом проведено восемь расчетов. Из них пять выполнены в двух различных программных комплексах для трехмерного газодинамического моделирования, а остальные три — по эмпирическим методикам расчета [1].

Расчеты № 1 и 2 произведены в программном комплексе ANSYS CFX 11.0 [2] и в FlowVision 2.3.2 [3]. В них рассчитывалась модель тройника с прямым углом подвода. Рабочее тело — пропанобутановая смесь.

Расчет № 3 — модель тройника того же типа, что и в расчетах № 1 и 2. Расчет производился по методике, изложенной в [1].

Расчет № 4 — модель тройника того же типа, что и в расчетах № 1, 2 и 3, но рабочее тело — воздух. Расчет производился в программном комплексе ANSYS CFX 11.0.

Расчет № 5 — модель тройника того же типа, что и в расчетах № 4, рабочее тело — воздух. Расчет производился по методике, изложенной в [1].

Расчеты № 6 и 7 произведены в ANSYS CFX 11.0 и в FlowVision 2.3.2. В них рассчитывалась модель тройника с углом подвода 30°. Рабочее тело — пропанобутановая смесь.

Расчет № 8 — модель тройника того же типа, что и в расчетах № 6 и 7. Рабочее тело — пропанобутановая смесь. Расчет производился по методике, изложенной в [1].

Расчет № 1

Исходные данные:

Расчетная модель представлена на рис. 1. Сечение 1–1 — вход потока № 1. Сечение 2–2 — вход потока № 2. Сечение 3–3 — выход (поток № 3). Границы модели были увеличены до размеров, указанных на рис. 1 (с целью «установления» течения в расчетной модели).

Рабочее тело пропанобутановая смесь.
Давление на входе в модель (для расчета в программном комплексе FlowVision 2.3.2).....
..... $P_{\text{вх}} = 1\,471\,500$ Па.
Опорное давление $P_{\text{ref}} = 1\,471\,318$ Па.
Температура на входе в модель ... $T_{\text{вх}}^* = 340$ К.
Скорости на входе в модель
..... $V_1 = 14,85$ м/с; $V_2 = 19,8$ м/с.
Молекулярный вес 50,85 кг/кмоль.
Молекулярная вязкость $3 \cdot 10^{-7}$ м²/с.
Теплопроводность 0,052 Вт м · К.
Удельная теплоемкость $2\,579 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

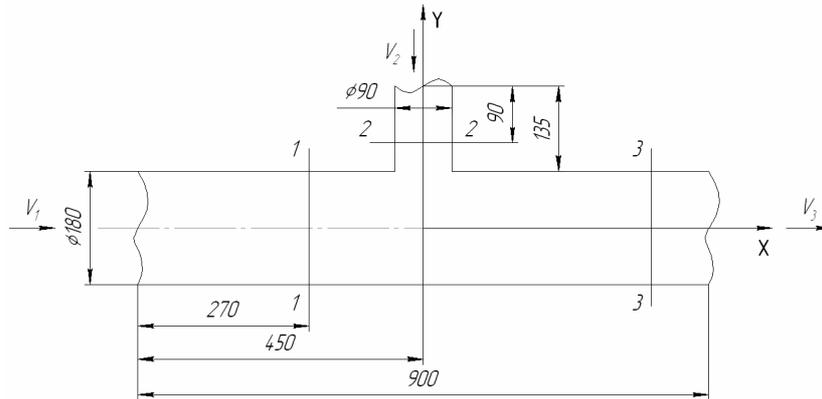


Рис. 1. Расчетная модель

Расчет проводился в программном комплексе ANSYS CFX 11.0. Число расчетных ячеек ≈ 80000 . Проводим 300 итераций до достижения устойчивого решения (сходимость решения уравнений по давлению порядка 10^{-4}).

Результаты расчета приведены на рис. 2–9.

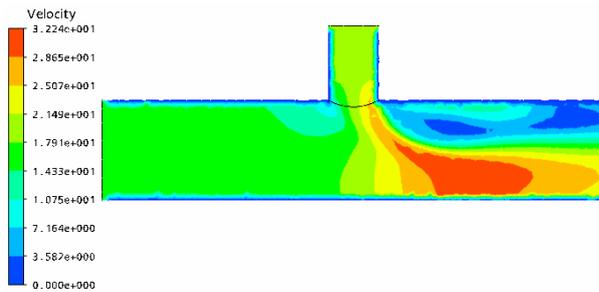


Рис. 2. Модули скоростей, м/с

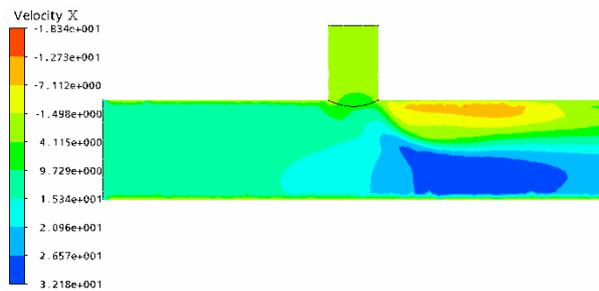


Рис. 3. Скорости по оси OX, м/с

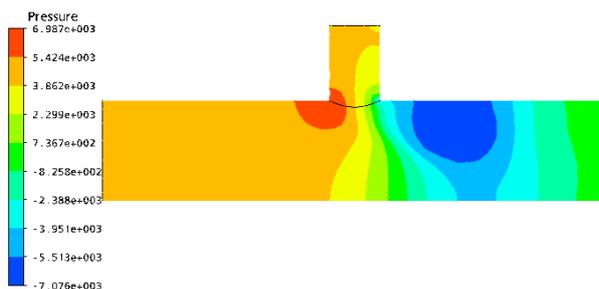


Рис. 4. Избыточные статические давления, Па

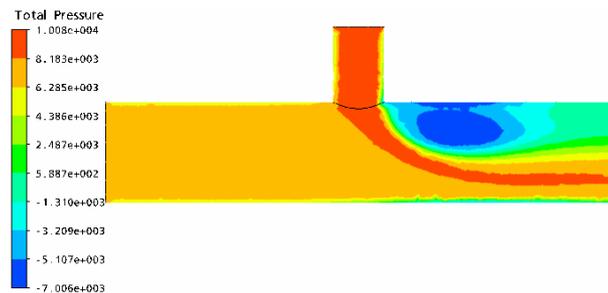


Рис. 5. Избыточные полные давления, Па

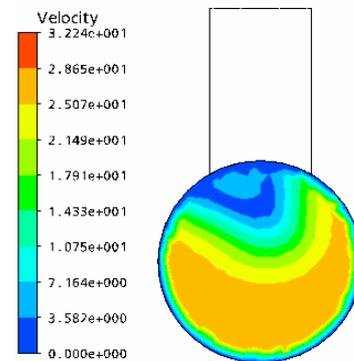


Рис. 6. Модули скоростей в сечении 3–3, м/с

Полное давление, расход и средняя скорость:

- в сечении 1–1: $P_1^* = 1479131$ Па, $G_1 = 9,9712$ кг/с, $V_1 = 14,8086$ м/с;

- в сечении 2–2: $P_2^* = 1480351$ Па, $G_2 = 3,2579$ кг/с, $V_2 = 19,6921$ м/с;

- в сечении 3–3: $P_3^* = 1476404$ Па, $G_3 = 13,224$ кг/с, $V_3 = 20,5506$ м/с.

Изменение полных давлений на участке 1–3:

$$\begin{aligned} \Delta P_{13}^* &= P_1^* - P_3^* = \\ &= 1479131 - 1476404 = 2727 \text{ Па.} \end{aligned}$$

Изменение полных давлений на участке 2–3:

$$P_{23}^* = P_2^* - P_3^* = 1480351 - 1476404 = 3947 \text{ Па}.$$

Коэффициент восстановления полного давления на участке 1–3:

$$\sigma_{13}^* = \frac{P_3^*}{P_1^*} = \frac{1476404}{1479131} = 0,99815.$$

Коэффициент восстановления полного давления на участке 2–3:

$$\sigma_{23}^* = \frac{P_3^*}{P_2^*} = \frac{1476404}{1480351} = 0,99733.$$

Расчет № 2

Расчетная модель и исходные данные соответствуют расчету № 1.

Расчет проводим в FlowVision 2.3.2. Число расчетных ячеек ≈ 15000 . Проводим 850 итераций (0,2 с) до достижения устойчивого решения (сходимость решения уравнений по давлению порядка 10^{-4}).

Результаты расчета приведены на рис. 7–11.

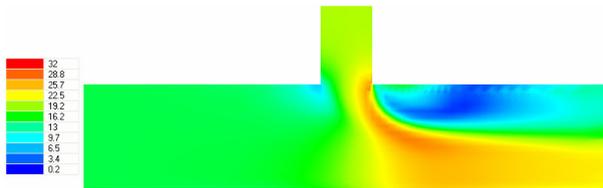


Рис. 7. Модули скоростей, м/с

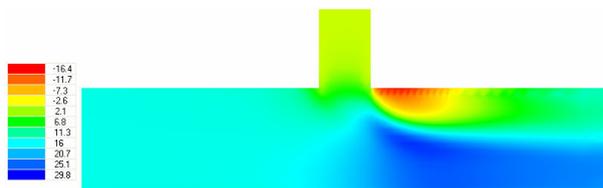


Рис. 8. Скорости по оси OX, м/с

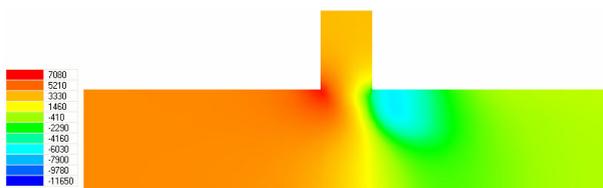


Рис. 9. Избыточные статические давления, Па

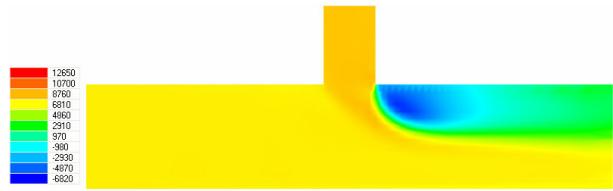


Рис. 10. Избыточные полные давления, Па

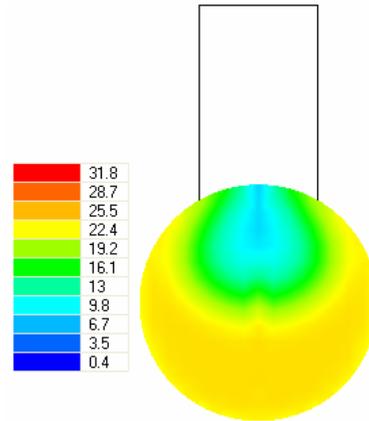


Рис. 11. Модули скоростей в сечении 3–3, м/с

Полное давление, расход и средняя скорость:

- в сечении 1–1: $P_1^* = 1478595$ Па, $G_1 = 9,9814$ кг/с, $V_1 = 14,80$ м/с;
- в сечении 2–2: $P_2^* = 1479715,8$ Па, $G_2 = 3,3208$ кг/с, $V_2 = 19,73$ м/с;
- в сечении 3–3: $P_3^* = 1476613$ Па, $G_3 = 13,3022$ кг/с, $V_3 = 19,8442$ м/с.

Изменение полных давлений на участке 1–3:

$$P_{13}^* = P_1^* - P_3^* = 1478595 - 1476613 = 1982 \text{ Па}.$$

Изменение полных давлений на участке 2–3:

$$P_{23}^* = P_2^* - P_3^* = 1479715,8 - 1476613 = 3102,8 \text{ Па}.$$

Коэффициент восстановления полного давления на участке 1–3:

$$\sigma_{13}^* = \frac{P_3^*}{P_1^*} = \frac{1476613}{1478595} = 0,99866.$$

Коэффициент восстановления полного давления на участке 2–3:

$$\sigma_{23}^* = \frac{P_3^*}{P_2^*} = \frac{1476613}{1479715,8} = 0,99790.$$

Расчет № 3

Расчетная модель и исходные данные соответствуют расчету № 1.

Расчет проводим по методике, изложенной в [1].

Коэффициент гидравлического сопротивления для потока № 2:

$$\xi_{23} = \frac{\Delta P_{23}^*}{\rho V_3^2 / 2} = A \xi'_{23};$$

$$\xi'_{23} = f\left(\frac{F_2}{F_3}, \frac{G_2}{G_3}\right).$$

Для данной задачи $\frac{F_2}{F_3} = 0,25$; $\frac{G_2}{G_3} = \frac{\rho V_2 F_2}{\rho V_3 F_3} = \frac{19,8}{19,8} \cdot 0,25 = 0,25$, где V_3 вычисляется из уравнения неразрывности (при таком уровне скоростей данный газ можно считать несжимаемым):

$$V_3 = \frac{\rho V_1 F_1 + \rho V_2 F_2}{\rho F_3} =$$

$$= \frac{14,85 \cdot 0,025447 + 19,8 \cdot 0,006362}{0,025447} = 19,8 \text{ м/с};$$

$\rho = 26,5 \text{ кг/м}^3$ (для пропанобутановой смеси с данным давлением).

$$A = 1,0; \quad \xi'_{23} = 1,04.$$

$$\xi_{23} = A \xi'_{23} = 1,0 \cdot 1,04 = 1,04.$$

Изменение полных давлений на участке 2–3:

$$\Delta P_{23} = \xi_{23} \rho V_3^2 / 2 =$$

$$= 1,04 \cdot \frac{26,5 \cdot (19,8)^2}{2} = 5402 \text{ Па}.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления для потока № 1:

$$\xi_{13} = \frac{\Delta P_{13}^*}{\rho V_3^2 / 2} = \xi'_{13} / \left(1 - \frac{G_2}{G_3}\right)^2.$$

$$\xi'_{13} = f\left(\frac{G_2}{G_3}\right) = 0,0325;$$

$$\xi_{13} = \xi'_{13} / \left(1 - \frac{V_2 F_2}{V_3 F_3}\right)^2 =$$

$$= 0,0325 / \left(1 - \frac{19,8}{19,8} \cdot 0,25\right)^2 = 0,578.$$

Изменение полных давлений на участке 1–3:

$$\Delta P_{13}^* = \xi_{13} \rho V_3^2 / 2 =$$

$$= 0,578 \cdot \frac{26,5 \cdot (19,8)^2}{2} = 3002 \text{ Па}.$$

Полное давление на выходе:

$$P_3^* = P_3 + \frac{\rho V_3^2}{2} =$$

$$= 1471318 + \frac{26,5 \cdot 19,8^2}{2} = 1476512,5 \text{ Па}.$$

Полное давление потока № 1 на входе в модель:

$$P_1^* = P_3^* + \Delta P_{13}^* =$$

$$= 1476512,5 + 3002 = 1479514,5 \text{ Па}.$$

Полное давление потока № 2 на входе в модель:

$$P_2^* = P_3^* + \Delta P_{23}^* =$$

$$= 1476512,5 + 5402 = 1481914,5 \text{ Па}.$$

Коэффициент восстановления полного давления на участке 1–3:

$$\sigma_{13}^* = \frac{P_3^*}{P_1^*} = \frac{1476512,5}{1479514,5} = 0,99797.$$

Коэффициент восстановления полного давления на участке 2–3:

$$\sigma_{23}^* = \frac{P_3^*}{P_2^*} = \frac{1476512,5}{1481914,5} = 0,99635.$$

Расчет № 4

Расчетная модель и исходные данные соответствуют расчету № 1, но рабочее тело – воздух.

Расчет проводился в программном комплексе ANSYS CFX 11.0. Число расчетных ячеек ≈ 80000 . Проводим 500 итераций, до достижения устойчивого решения (сходимость решения уравнений по давлению порядка 10^{-4}).

Результаты расчета приведены на рис. 12–16.

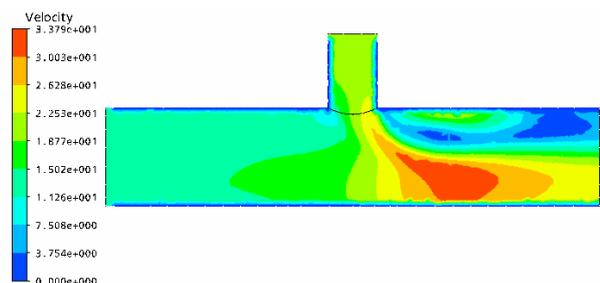


Рис. 12. Модули скоростей, м/с

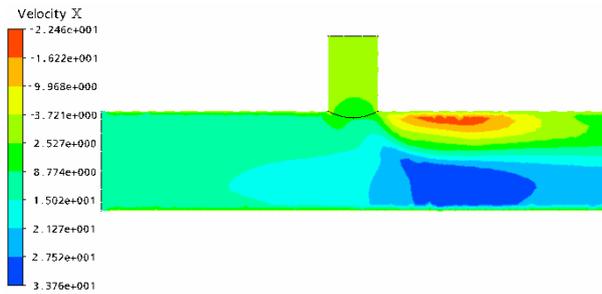


Рис. 13. Скорости по оси OX, м/с

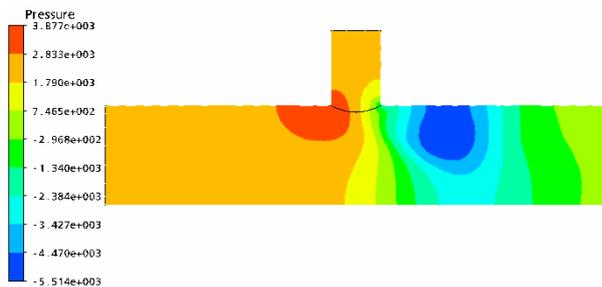


Рис. 14. Избыточные статические давления, Па

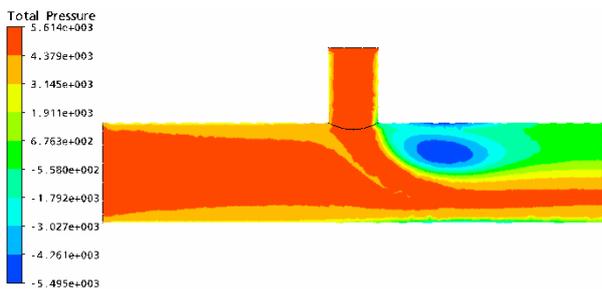


Рис. 15. Избыточные полные давления, Па

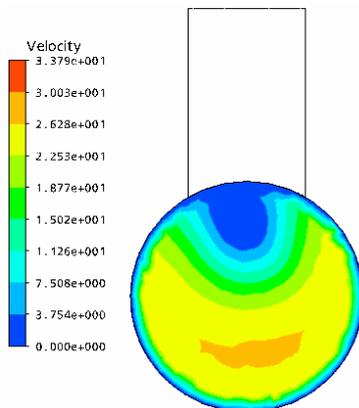


Рис. 16. Модули скоростей в сечении 3–3, м/с

Полное давление, расход и средняя скорость:

• в сечении 1–1: $P_1^* = 1475674$ Па, $G_1 = 5,6715$ кг/с, $V_1 = 14,8046$ м/с;

• в сечении 2–2: $P_2^* = 1476408$ Па, $G_2 = 1,8540$ кг/с, $V_2 = 19,6845$ м/с;

• в сечении 3–3: $P_3^* = 1474254$ Па, $G_3 = 7,5259$ кг/с, $V_3 = 20,0556$ м/с.

Изменение полных давлений на участке 1–3:

$$\Delta P_{13}^* = P_1^* - P_3^* = 1475674 - 1474254 = 1420 \text{ Па.}$$

Изменение полных давлений на участке 2–3:

$$\Delta P_{23}^* = P_2^* - P_3^* = 1476408 - 1474254 = 2154 \text{ Па.}$$

Коэффициент восстановления полного давления на участке 1–3:

$$\sigma_{13}^* = \frac{P_3^*}{P_1^*} = \frac{1474254}{1475674} = 0,99904.$$

Коэффициент восстановления полного давления на участке 2–3:

$$\sigma_{23}^* = \frac{P_3^*}{P_2^*} = \frac{1474254}{1476408} = 0,99854.$$

Расчет № 5

Расчетная модель и исходные данные соответствуют расчету № 4.

Расчет проводим по методике, изложенной в [1], аналогично расчету № 3.

Коэффициент гидравлического сопротивления для потока № 2:

$$\xi_{23} = \frac{\Delta P_{23}^*}{\rho V_3^2 / 2} = A \xi'_{23}; \quad \xi'_{23} = f \left(\frac{F_2}{F_3}, \frac{G_2}{G_3} \right).$$

Для данной задачи $\frac{F_2}{F_3} = 0,25$; $\frac{G_2}{G_3} = \frac{\rho V_2 F_2}{\rho V_3 F_3} = \frac{19,8}{19,8} \cdot 0,25 = 0,25$, где V_3 вычисляется из уравнения неразрывности (при таком уровне скоростей данный газ можно считать несжимаемым):

$$V_3 = \frac{\rho V_1 F_1 + \rho V_2 F_2}{\rho F_3} = \frac{14,85 \cdot 0,025447 + 19,8 \cdot 0,006362}{0,025447} = 19,8 \text{ м/с};$$

$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{1471318}{287 \cdot 340} = 15,08$ кг/м³ (для воздуха с данным давлением).

$$A = 1,0; \quad \xi'_{23} = 1,04.$$

$$\xi_{23} = A \xi'_{23} = 1,0 \cdot 1,04 = 1,04.$$

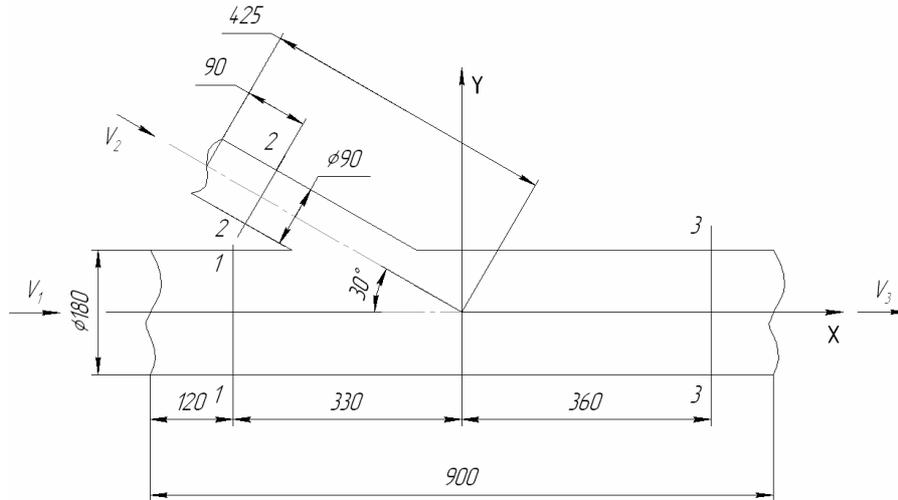


Рис. 17. Расчетная модель

Изменение полных давлений на участке 2–3:

$$\begin{aligned}\Delta P_{23}^* &= \xi_{23} \rho V_3^2 / 2 = \\ &= 1,04 \cdot \frac{15,08 \cdot (19,8)^2}{2} = 3074 \text{ Па}.\end{aligned}$$

Коэффициент гидравлического сопротивления для потока № 1:

$$\xi_{13} = \frac{\Delta P_{13}^*}{\rho V_3^2 / 2} = \xi'_{13} \left(1 - \frac{G_2}{G_3}\right)^2.$$

$$\xi'_{13} = f \left(\frac{G_2}{G_3}\right) = 0,325;$$

$$\begin{aligned}\xi_{13} &= \xi'_{13} / \left(1 - \frac{V_2 F_2}{V_3 F_3}\right)^2 = \\ &= 0,325 / \left(1 - \frac{19,8}{19,8} \cdot 0,25\right)^2 = 0,578.\end{aligned}$$

Изменение полных давлений на участке 1–3:

$$\begin{aligned}\Delta P_{13}^* &= \xi_{13} \rho V_3^2 / 2 = \\ &= 0,578 \cdot \frac{15,08 \cdot (19,8)^2}{2} = 1708,5 \text{ Па}.\end{aligned}$$

Полное давление на выходе:

$$\begin{aligned}P_3^* &= P_3 + \frac{\rho V_3^2}{2} = 1471318 + \\ &+ \frac{15,08 \cdot 19,8^2}{2} = 1474274 \text{ Па}.\end{aligned}$$

Полное давление потока № 1 на входе в модель:

$$\begin{aligned}P_1^* &= P_3^* + \Delta P_{13}^* = \\ &= 1474274 + 1708,5 = 1475982,5 \text{ Па}.\end{aligned}$$

Полное давление потока № 2 на входе в модель:

$$\begin{aligned}P_2^* &= P_3^* + \Delta P_{23}^* = \\ &= 1474274 + 3074 = 1477348 \text{ Па}.\end{aligned}$$

Коэффициент восстановления полного давления на участке 1–3:

$$\sigma_{13}^* = \frac{P_3^*}{P_1^*} = \frac{1474274}{1475982,5} = 0,99884.$$

Коэффициент восстановления полного давления на участке 2–3:

$$\sigma_{23}^* = \frac{P_3^*}{P_2^*} = \frac{1474274}{1477348} = 0,99792.$$

Расчет № 6

Расчетная модель представлена на рис. 17. Исходные данные соответствуют расчету № 1. Расчет проводился в программном комплексе ANSYS CFX 11.0. Число расчетных ячеек ≈ 80600 . Проводим 30 итераций, до достижения устойчивого решения (сходимость решения уравнений по давлению порядка 10^{-4}).

Результаты расчета приведены на рис. 18–22.

Полное давление, расход и средняя скорость:

• в сечении 1–1: $P_1^* = 1476104,7$ Па, $G_1 = 9,999$ кг/с, $V_1 = 14,8587$ м/с;

- в сечении 2–2: $P_2^* = 1479122$ Па, $G_2 = 3,319$ кг/с, $V_2 = 20,0518$ м/с;
- в сечении 3–3: $P_3^* = 1476557$ Па, $G_3 = 13,3178$ кг/с, $V_3 = 19,8481$ м/с.

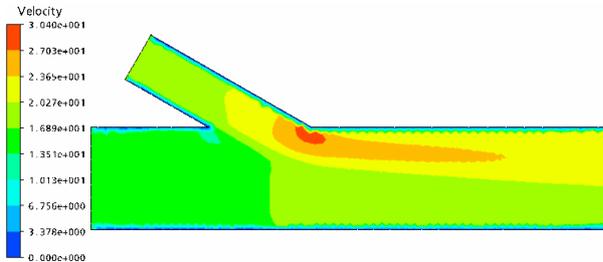


Рис. 18. Модули скоростей, м/с

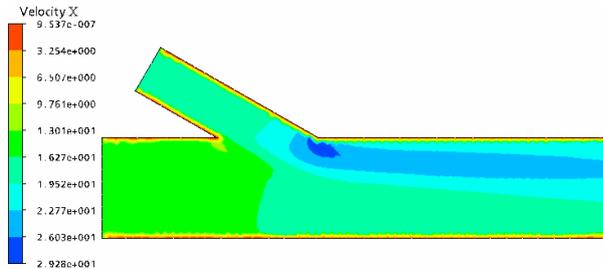


Рис. 19. Скорости по оси OX, м/с

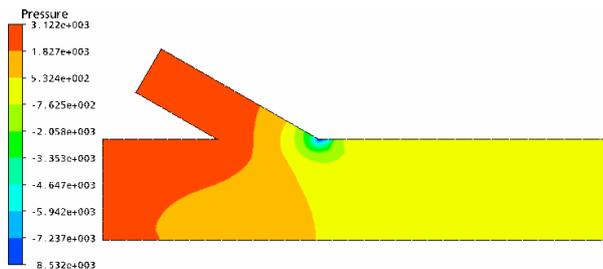


Рис. 20. Избыточные статические давления, Па

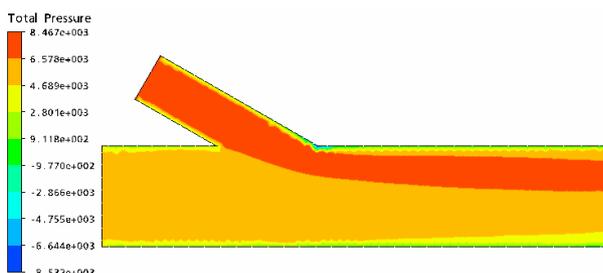


Рис. 21. Избыточные полные давления, Па

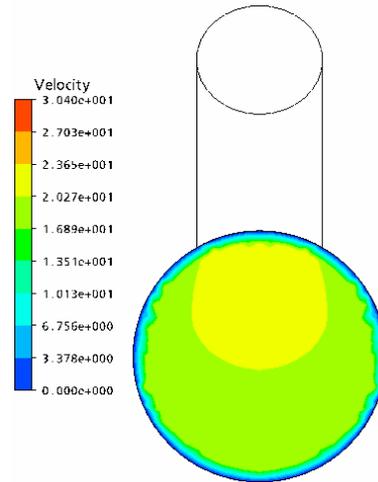


Рис. 22. Модули скоростей в сечении 3–3, м/с

Изменение полных давлений на участке 1–3:

$$\Delta P_{13}^* = P_1^* - P_3^* = 1476104,7 - 1476557 = -452,3 \text{ Па (поток № 2 эжектирует поток № 1).}$$

Изменение полных давлений на участке 2–3:

$$\Delta P_{23}^* = P_2^* - P_3^* = 1479122 - 1476557 = 2565 \text{ Па.}$$

Коэффициент восстановления полного давления на участке 1–3: $\sigma_{13}^* = \frac{P_3^*}{P_1^*} = \frac{1476557}{1476104,7} = 1,00031$ (поток № 2 эжектирует поток № 1).

Коэффициент восстановления полного давления на участке 2–3:

$$\sigma_{23}^* = \frac{P_3^*}{P_2^*} = \frac{1476557}{1479122} = 0,99826.$$

Расчет № 7

Расчетная модель и исходные данные соответствуют расчету № 6. Расчет проводим в FlowVision 2.3.2. Число расчетных ячеек ≈ 15000 . Проводим 1450 итераций до достижения устойчивого решения (сходимость решения уравнений по давлению порядка 10^{-4}).

Результаты расчета приведены на рис. 22–26.

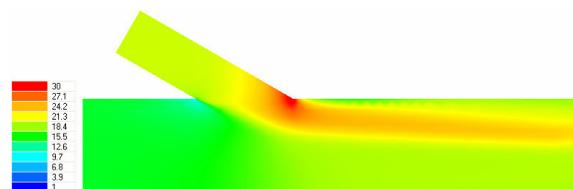


Рис. 23. Модули скоростей, м/с

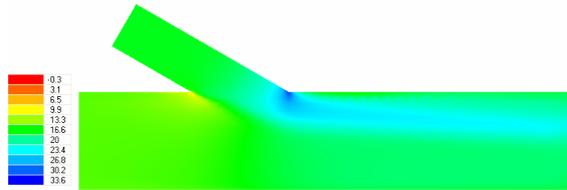


Рис. 24. Скорости по оси OX, м/с

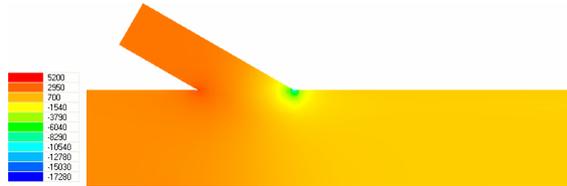


Рис. 25. Избыточные статические давления, Па

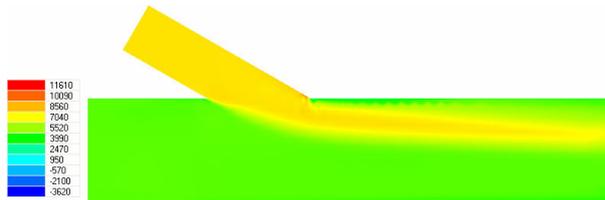


Рис. 26. Избыточные полные давления, Па

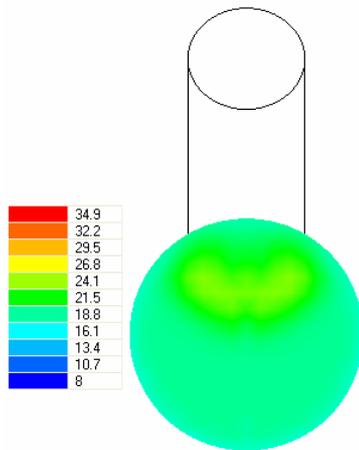


Рис. 27. Модули скоростей в сечении 3–3, м/с

Полное давление, расход и средняя скорость:

- в сечении 1–1: $P_1^* = 1476162$ Па, $G_1 = 9,9848$ кг/с, $V_1 = 14,8261$ м/с;
- в сечении 2–2: $P_2^* = 1478978,5$ Па, $G_2 = 3,294$ кг/с, $V_2 = 19,73$ м/с;
- в сечении 3–3: $P_3^* = 1476570$ Па, $G_3 = 13,2086$ кг/с, $V_3 = 19,81$ м/с.

Изменение полных давлений на участке 1–3:

$$\Delta P_{13}^* = P_1^* - P_3^* = 1476162 - 1476570 = -408 \text{ Па (поток № 2 эжектирует поток № 1)}.$$

Изменение полных давлений на участке 2–3:

$$\begin{aligned} \Delta P_{23}^* &= P_2^* - P_3^* = \\ &= 1478978,5 - 1476570 = 2408,5 \text{ Па.} \end{aligned}$$

Коэффициент восстановления полного давления на участке 1–3:

$$\sigma_{13}^* = \frac{P_3^*}{P_1^*} = \frac{1476570}{1476162} = 1,00027 \text{ (поток № 2 эжектирует поток № 1)}.$$

Коэффициент восстановления полного давления на участке 2–3:

$$\sigma_{23}^* = \frac{P_3^*}{P_2^*} = \frac{1476570}{1478978,5} = 0,99837.$$

Расчет № 8

Расчетная модель и исходные данные соответствуют расчету № 6.

Расчет проводим по методике, изложенной в [1].

Коэффициент гидравлического сопротивления для потока № 2:

$$\xi_{23} = \frac{\Delta P_{23}^*}{\rho V_3^2 / 2} = A \xi'_{23}; \quad \xi'_{23} = f \left(\frac{F_2}{F_3}, \frac{G_2}{G_3} \right).$$

$$\begin{aligned} \text{Для данной задачи } \frac{F_2}{F_3} &= 0,25; \quad \frac{G_2}{G_3} = \frac{\rho V_2 F_2}{\rho V_3 F_3} = \\ &= \frac{19,8}{19,8} \cdot 0,25 = 0,25, \end{aligned}$$

где V_3 вычисляется из уравнения неразрывности (при таком уровне скоростей данный газ можно считать несжимаемым):

$$\begin{aligned} V_3 &= \frac{\rho V_1 F_1 + \rho V_2 F_2}{\rho F_3} = \\ &= \frac{14,85 \cdot 0,0254447 + 19,8 \cdot 0,006362}{0,0254447} = 19,8 \text{ м/с;} \end{aligned}$$

$\rho = 26,5$ кг/м³ (для воздуха с данным давлением).

$$A = 1,0; \quad \xi'_{23} = 0,575.$$

$$\xi_{23} = A \xi'_{23} = 1,0 \cdot 0,575 = 0,575.$$

Изменение полных давлений на участке 2–3:

$$\begin{aligned} \Delta P_{23}^* &= \xi_{23} \rho V_3^2 / 2 = \\ &= 0,575 \cdot \frac{26,5 \cdot (19,8)^2}{2} = 2987 \text{ Па.} \end{aligned}$$

Коэффициент гидравлического сопротивления для потока № 1:

$$\xi_{13} = \frac{\Delta P_{13}^*}{\rho V_3^2 / 2} = \xi'_{13} / \left(1 - \frac{G_2}{G_3}\right)^2.$$

$$\xi'_{13} = f\left(\frac{G_2}{G_3}\right) = -0,035;$$

$$\begin{aligned} \xi_{13} &= \xi'_{13} / \left(1 - \frac{V_2 F_2}{V_3 F_3}\right)^2 = \\ &= -0,035 / \left(1 - \frac{19,8}{19,8} \cdot 0,25\right)^2 = -0,062. \end{aligned}$$

Изменение полных давлений на участке 1–3:

$$\begin{aligned} \Delta P_{13}^* &= \xi_{13} \rho V_3^2 / 2 = \\ &= -0,062 \cdot \frac{26,5 \cdot (19,8)^2}{2} = -322 \text{ Па}. \end{aligned}$$

Полное давление на выходе:

$$\begin{aligned} P_3^* &= P_3 + \frac{\rho V_3^2}{2} = \\ &= 1471318 + \frac{26,5 \cdot 19,8^2}{2} = 1476512,5 \text{ Па}. \end{aligned}$$

Полное давление потока № 1 на входе в модель:

$$\begin{aligned} P_1^* &= P_3^* + \Delta P_{13}^* = \\ &= 1476512,5 - 322 = 1476190,5 \text{ Па}. \end{aligned}$$

Полное давление потока № 2 на входе в модель:

$$\begin{aligned} P_2^* &= P_3^* + \Delta P_{23}^* = \\ &= 1476512,5 + 2987 = 1479499,5 \text{ Па}. \end{aligned}$$

Коэффициент восстановления полного давления на участке 1–3:

$$\sigma_{13}^* = \frac{P_3^*}{P_1^*} = \frac{1476512,5}{1476190,5} = 1,00022 \text{ (поток № 2 эжектирует поток № 1)}.$$

Коэффициент восстановления полного давления на участке 2–3:

$$\sigma_{23}^* = \frac{P_3^*}{P_2^*} = \frac{1476512,5}{1479499,5} = 0,99798.$$

Результаты, по которым проводилось сравнение, приведены в табл. 1.

Расхождение расчета с экспериментом по коэффициенту восстановления полного давления σ_{13}^* и σ_{23}^* составляют доли процентов во всех расчетах.

Расхождение расчета с экспериментом по скорости на выходе из модели (поток № 3) V_3 доходят до 4%, что тоже вполне приемлемо для подобных расчетов.

Расхождение расчета с экспериментом по изменению полного давления ΔP_{13}^* и ΔP_{23}^* (перепады давления на входе и выходе труб) составляют от 10 до 40%, что может быть объяснено недостаточным разрешением сетки в пограничном слое (который и определяет потери давления).

Расчеты на второй модели (рис. 17) имели более высокую скорость расчета (расчет № 6 в ANSYS CFX 11.0 достиг необходимой сходимости решения уравнений по давлению порядка 10^{-4} на 30 итерации).

Сравнив результаты расчетов в программных комплексах ANSYS CFX 11.0 и FlowVision 2.3.2 с экспериментальными данными, можно сделать вывод, что оба программных комплекса дают вполне приемлемые результаты. Небольшая некорректность результатов в занижении обоими программными комплексами потерь давления (определяемая течением в пограничном слое), объясняется недостаточным разрешением сетки вблизи стенок. Проблема может быть решена при использовании более мелкой сетки. Но при уменьшении размера элемента точность расчета увеличивается пропорционально уменьшению размера элемента, а количество элементов увеличивается в кубической прогрессии. Соответственно, время, необходимое для расчета, также увеличивается в кубической прогрессии. Для проведения расчетов с желаемой точностью и в разумные сроки необходимо применение более мощных компьютеров.

По полям скоростей оба программных комплекса дают корректные результаты.

Программный комплекс FlowVision 2.3.2 во всех расчетах (№ 2, 7) дает несколько большее расхождение с экспериментом (что может объясняться крупной сеткой — при одной и той же модели, количество элементов в модели для FlowVision порядка 15 000, в модели для программного комплекса для определения параметров рабочего тела — порядка 80 000 элементов).

Таблица 1

Сравнение результатов расчетов

№	P_1^* , Па	P_2^* , Па	P_3^* , Па	ΔP_{13}^* , Па	ΔP_{23}^* , Па	V_3 , м/с	σ_{13}^*	σ_{23}^*	Расхождение с экспериментом				
									$\sigma_{13}^* \%$	$\sigma_{23}^* \%$	$\Delta P_{13}^* \%$	$\Delta P_{23}^* \%$	$V_3 \%$
1	1479131	1480351	1470464	2727	3947	20,5506	0,99815	0,99733	-0,018	-0,098	9,161	26,934	-3,791
2	1478595	1479716	1476613	1982	3103	19,8442	0,99866	0,99790	-0,069	-0,155	33,977	42,562	-0,223
3	1479514	1481914	1476512	3002	5402	19,8	0,99797	0,99635	—	—	—	—	—
4	1475614	1476408	1475264	1420	2154	20,0556	0,99904	0,99854	-0,020	-0,062	16,886	29,928	-1,291
5	1475982	1477348	1474274	1708,5	3074	19,8	0,99884	0,99792	—	—	—	—	—
6	1476105	1479122	1476557	-452,3	2565	19,8481	1,00031	0,99826	-0,009	-0,028	-40,466	14,128	-0,243
7	1476162	1478979	1476570	-408	2409	19,81	1,00027	0,99837	-0,005	-0,039	-26,708	19,367	-0,050
8	1476190	1479499	1476512	-322	2987	19,8	1,00022	0,99798	—	—	—	—	—

Расчеты в программном комплексе FlowVision 2.3.2 сошлись на большем числе итераций и занимали больше времени (несмотря на то, что количество элементов в модели для FlowVision меньше в пять раз, чем в модели для ANSYS CFX 11.0).

Расчеты с разным рабочим телом на одной модели (пропанобутановая смесь в расчетах № 1, 2, 3 и воздух в расчетах № 4 и 5) дают сходные корректные результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные расчеты и их анализ показывают, что современные программные комплексы для численного трехмерного газодинамического моделирования имеют хорошую адекватность.

Программные средства, используемые для прочностного, теплового и газодинамического анализа проектируемых двигателей, их систем, узлов и деталей, отличаются высокой сложностью и стоимостью, однако в настоящее время для создания авиационных ГТД новых поколений необходимо развитие и внедрение в промышленности средств компьютерной поддержки жизненного цикла изделий (CALS), в том числе и газодинамического анализа — ANSYS CFX, FlowVision, Star-CD и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Идельчик, И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик ; под ред. М. О. Штейнберга. М. : Машиностроение, 1992. 672 с.
2. **Ansys, Inc.** [Электронный ресурс] (<http://www.ansys.com>).
3. **FlowVision** [Электронный ресурс] (<http://www.flowvision.ru>).

ОБ АВТОРАХ



Ахмедзянов Дмитрий Альбертович, проф. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1997). Д-р техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. рабочих процессов ГТД, мат. моделей сложн. техн. объектов.



Кишалов Александр Евгеньевич, аспирант каф. авиац. двигателей, инж.-конст. ФГУП «НПП «Мотор». Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 2006). Готовит дис. в обл. автоматизации форсажных камер сгорания авиац. ГТД.